

Problemy sterowania hydraulicznymi zaworami redukcji ciśnienia przy zastosowaniu regulatorów zewnętrznych

Ewelina Kilian, Wojciech Koral

Wprowadzenie

Utrzymanie odpowiedniej wartości ciśnienia sieci wodociągowej jest obowiązkiem każdego przedsiębiorstwa odpowiadającego za dostawę i dystrybucję wody pitnej. Obowiązek ten regulowany jest zapisami rozporządzeniami ministra infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. (z późniejszymi zmianami) w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. W przypadku dostawy wody do odbiorcy o ciśnieniu wyższym niż 6,0 barów przedsiębiorstwo wodociągowe ma obowiązek zamontować u odbiorcy na własny koszt zawór redukujący ciśnienie. Przykładowy reduktor ciśnienia, służący do montażu w instalacjach wewnętrznych, przedstawiono na rys. 1.

Jednocześnie jednym z kluczowych sposobów obniżenia rzeczywistych strat wody, proponowanych przez IWA [1], jest regulacja ciśnienia sieci wodociągowej poprzez jego obniżanie i dopasowanie wartości ciśnienia dyspozycyjnego do konkretnych potrzeb zasilanego obszaru, z uwzględnieniem wymagań w krytycz-

nym punkcie sieci. Dodatkowo w przypadku konieczności eliminacji przekroczeń wartości maksymalnych ciśnienia o wiele korzystniej jest zainwestować w jedno urządzenie obniżające ciśnienie w całym problematycznym rejonie, niż wyposażać w reduktory większość odbiorców.

Wartością dodaną tego rodzaju działań są: obniżenie wydajności występujących na sieci wodociągowej nieszczelności, obniżenie częstości występowania awarii oraz poprawa trwałości sieci. Wymienione efekty regulacji ciśnienia przekładają się bezpośrednio na wynik finansowy przedsiębiorstwa poprzez obniżenie ilości wody traconej, jak i kosztów usuwania awarii.

Rozwiązania stosowane w celu redukcji/regulacji wartości ciśnienia sieci wodociągowej

W celu redukcji/regulacji ciśnienia sieci wodociągowej stosowane są następujące rozwiązania:

- przemykanie zasuw/przepustnic;
- zawory redukcyjne sprężynowe;
- zawory redukcyjne hydrauliczne.

Zastosowanie regulacji ciśnienia sieci wodociągowej poprzez dławienie zasuw/przepustnic jest nieefektywne – w wypadku niskich wartości przepływów (zazwyczaj nocą) następuje podwyższenie ciśnienia względem wymaganej wartości, a przy wysokich wartościach przepływów – gwałtowne spadki ciśnienia [2, 3]. Zastosowanie zaworów sprężynowych nie jest odpowiednie z powodu konstrukcji urządzeń, niedostosowanej do specyfiki pracy sieci wodociągowej – szybkozmienne wahania rozbiorów powodują niestabilną wartość zredukowanego ciśnienia, zmieniającą się w zakresie 1,0–1,5 bara. Najskuteczniejszym sposobem regulacji jest zastosowanie hydrau-

licznych reduktorów ciśnienia, które nie tylko pozwalają na dostosowanie wartości ciśnienia do potrzeb zasilanej strefy, lecz gwarantują również jego stabilność praktycznie bez względu na wielkość rozbiorów. Porównanie efektów dla poszczególnych sposobów regulacji ciśnienia sieci wodociągowej przedstawiono na rys. 2–4.

Sterowanie hydraulicznymi zaworami redukcji ciśnienia

Zawory redukcyjne hydrauliczne, zasilające w wodę wydzielony rejon sieci, gwarantują zachowanie stałej, zadanej wartości ciśnienia w ciągu całej doby. Zmniejszenie rozbiorów wody, występujące przeważnie w godzinach nocnych, powoduje, że sieć wodociągowa pracuje pod nadmiernym ciśnieniem. Z powodu bezpośredniej zależności pomiędzy wartością ciśnienia sieci a wydajnością wy-cieków dopasowanie wartości ciśnienia dyspozycyjnego do chwilowych potrzeb zasilanego rejonu staje się uzasadnione. Tego rodzaju regulacje możliwe są przy zastosowaniu zewnętrznych sterowników zaworów redukcyjnych.

Sterowniki zewnętrzne reduktorów ciśnienia (dostępne w Polsce) produkowane są m.in. przez firmy: Technolog, Bermad, Hawle, Biatel czy Radcom. Urządzenia posiadają możliwość dwukierunkowej komunikacji w celu przesyłu danych, alarmów czy zmiany nastaw ciśnienia wyjściowego reduktora. Bardzo ważna jest również możliwość ustawienia maksymalnej wartości ciśnienia w przypadku uszkodzenia sterownika. Poza tym w zależności od zastosowanego rozwiązania uzyskiwana jest dodatkowa funkcjonalność w postaci możliwości wyboru trybów pracy sterownika przy równoczesnej rejestracji i archiwizacji danych.



Rys. 1. Reduktor ciśnienia wewnętrznych instalacji wodnych

Rodzaje i parametry pracy sterowników hydraulicznych reduktorów ciśnienia

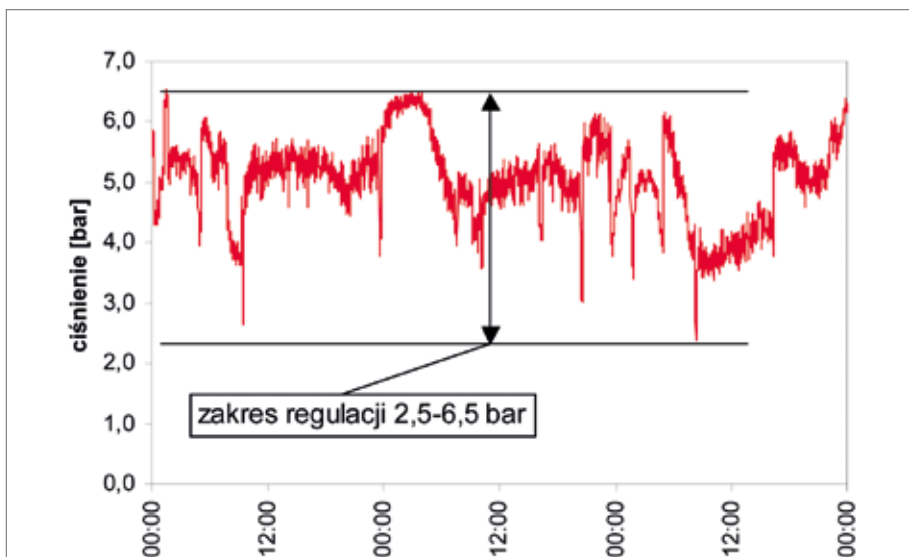
Rozróżniamy następujące rodzaje sterowników nastaw reduktorów w oparciu o rodzaj czynnika sterującego używanego przez poszczególne urządzenia:

- sterowniki pneumatyczne;
- sterowniki hydrauliczne;
- sterowniki mechaniczne.

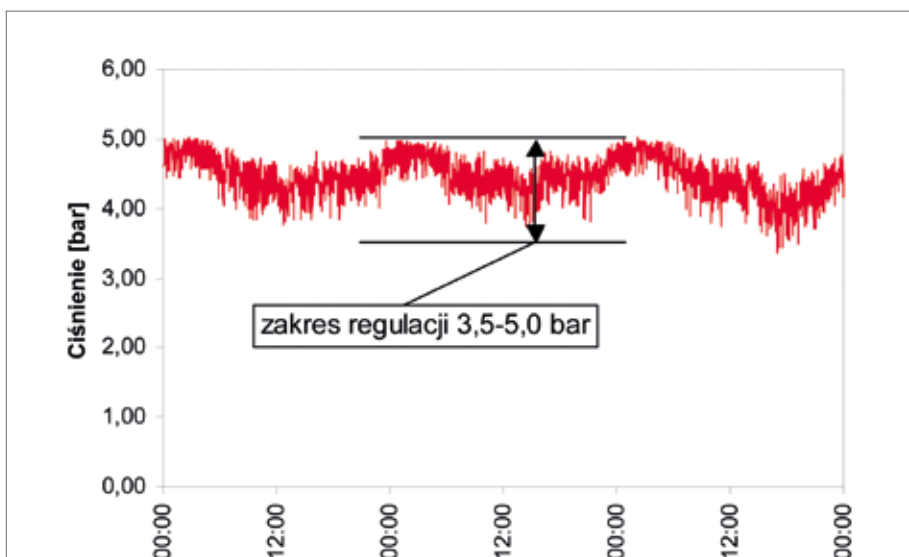
Zasada działania + montaż

Ogólna zasada pracy sterowników polega na kontroli wartości ciśnienia za reduktorem (zredukowanego), porównywaniu tej wartości z wartością zadaną w profilu sterowania i regulacji za pośrednictwem czynnika sterującego w przypadku odchyłu od wartości zadanej. Montaż każdego ze sterowników odbywa się poprzez modyfikację zaworu pilotowego reduktora ciśnienia:

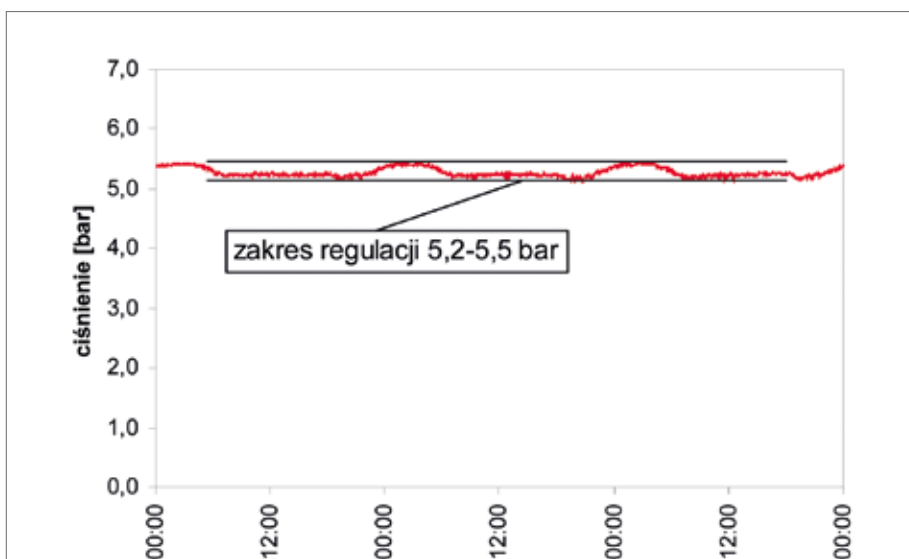
- Sterownik pneumatyczny (rys. 5) – montaż sterownika polega na wkręceniu od dołu zaworu pilotowego w miejsce śruby, tzw. *bios chamber*, do którego po przeciwnej stronie doprowadzana jest rurka, przez którą włączane lub upuszczane jest powietrze przez sterownik. Ciśnienie powietrza oddziałuje na membranę *bios chamber* oraz na tłok umieszczony wewnątrz śruby wkręconej w zawór pilotowy. Ruch tłoka powoduje zmianę nastawy ciśnienia zaworu redukcyjnego.
- Sterownik hydrauliczny (rys. 6) – montaż sterownika polega na wkręceniu tzw. aktuatora w miejsce śruby regulacyjnej zaworu pilotowego reduktora ciśnienia. Po przeciwnej stronie aktuatora doprowadzona jest rurka z wodą pod odpowiednim ciśnieniem, regulowanym przez zawór typu solenoid sterownika. Ciśnienie wody doprowadzonej do aktuatora wpływa na położenie tłoka umieszczonego wewnątrz śruby wkręconej do zaworu pilotowego. Tłok oddziałuje na membranę, zmieniając jej położenie, a przez to wpływając na nastawę ciśnienia zaworu głównego. Zmiany nastaw minimalnego i maksymalnego ciśnienia regulacji dokonujemy przy montażu poprzez zmianę stopnia wkręcenia aktuatora w zawór pilotowy – jest to również zabezpieczenie mechaniczne przy uszkodzeniu regulatora, nastawa maksymalna odpowiada maksymalnemu ciśnieniu wyjściowemu reduktora.



Rys. 2. Profil ciśnienia – regulacja przepustnicą sterowaną zdalnie (komora A)



Rys. 3. Profil ciśnienia – regulacja zaworem redukcyjnym sprężynowym (komora B)



Rys. 4. Profil ciśnienia – regulacja zaworem redukcyjnym hydraulicznym (komora A)



Rys. 5. Montaż – sterownik pneumatyczny



Rys. 6. Montaż – sterownik hydrauliczny



Rys. 7. Montaż – sterownik mechaniczny

Oba opisane rozwiązania możliwe są do zastosowania w niemal każdym rodzaju reduktora sterowanego pilotem.

- Sterownik mechaniczny (rys. 7) – wykonany praktycznie dla jednego określonego zaworu redukcyjnego. Jego montaż polega na wkręceniu od góry do zaworu pilotowego silnika krokowego. Silnik elektryczny – na podstawie sprężenia zwrotnego z odczytem ciśnienia za reduktorem i porównaniu z krzywą regulacji – kontroluje stopień wkręcenia śruby nastawnej zaworu pilotowego, ustawiając wymaganą wartość ciśnienia.

Rodzaje regulacji sterowników zaworów redukcyjnych

Sterowniki zaworów redukcyjnych dają możliwość kontroli wartości ciśnienia sieci wodociągowej w następujących trybach:

a. tryb manualny

Opcja służąca przede wszystkim do sprawdzenia reakcji sterownika podczas jego konfiguracji na wprowadzoną, chwilową wartość ciśnienia.

b. tryb kontroli wg profilu czasowego

Regulacja polega na ustawieniu różnych wartości ciśnienia wyjściowego reduktora w określonych przedziałach czasu. Profil czasowy ustalany jest w zależności od wielkości rozbiórów, występujących w poszczególnych porach dnia. Tego rodzaju regulacja służy przede wszystkim do obniżania wartości ciśnienia w godzinach zmniejszonych rozbiórów wody (zazwyczaj w godzinach nocnych). Najprostsza wersja sterowników posiada dwie nastawy czasowe (min/max), wersje rozbudowane pozwalają na wybór kilku czy kilkunastu ustawień, łącznie z wyborem trybu dni roboczych/wolnych.

Na rys. 8 przedstawiono przykładowy profil pracy reduktora ciśnienia, sterowanego sterownikiem zewnętrznym zgodnie z zadanymi nastawami ciśnienia w ustalonych przedziałach czasu.

Przy tym typie regulacji bardzo ważne jest, żeby zmiany pomiędzy poszczególnymi nastawami ciśnienia realizować stosunkowo łagodnie (jako rozłożone w czasie), w celu wyeliminowania możliwości powstania uderzeń hydraulicznych. Tego rodzaju postępowanie jest szczególnie ważne przy reduktorach posiadających wy-

łącznie możliwość regulacji szybkości otwierania zaworu, jako zabezpieczenia przed gwałtownym wzrostem ciśnienia.

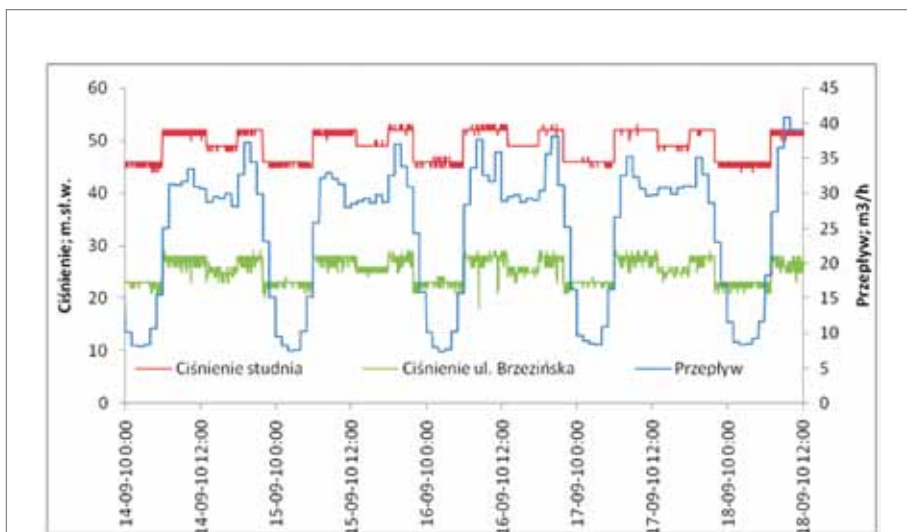
c. tryb kontroli ciśnienia na podstawie profilu przepływu

Zasada regulacji opiera się na wprowadzeniu do urządzenia krzywej zależności ciśnienia od przepływu. Zależność ta określana jest na podstawie analizy wartości ciśnienia w krytycznym punkcie sieci w zależności od mierzonych przepływów przez reduktor. Kontrola ciśnienia na podstawie przepływu wymaga dostarczania ciągłej informacji o chwilowej wartości zużycia wody. Dla tego trybu regulacji najkorzystniejsze jest zastosowanie przepływomierza lub wodomierza o stosunkowo małej wadze impulsu, rejestrowanego z odpowiednią częstotliwością przez sterownik. Dzięki chwilowej informacji o wartości przepływu (wyznaczonej przez sterownik) zadawana jest odpowiadająca jej wartość ciśnienia.

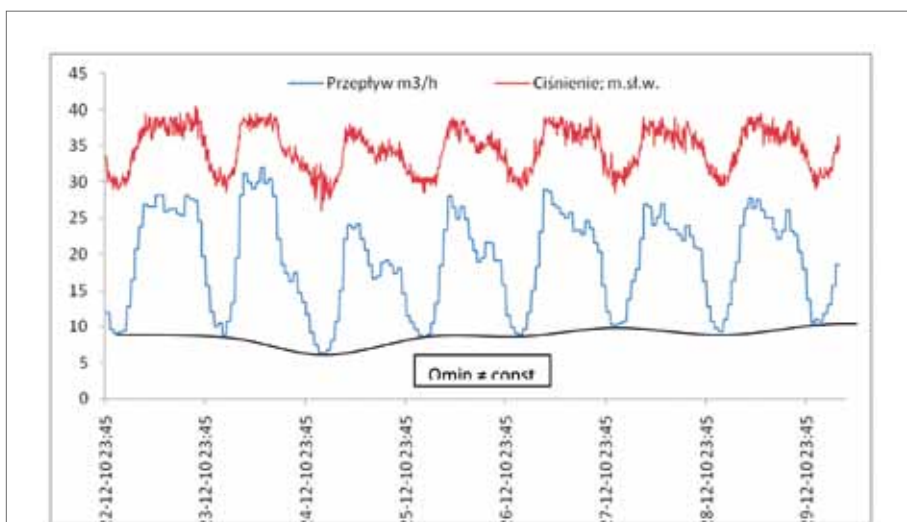
Kluczowe dla stabilnej pracy urządzenia i regulowanej sieci jest ustawienie w sterowniku odpowiedniej częstotliwości zmiany nastawy ciśnienia. Częstotliwość zmiany nastaw zależy od liczby dostarczanych impulsów (obliczonej przez sterownik przepływu). Sterownik jednego z producentów posiada możliwość zadania jednej z trzech możliwych szybkości reakcji na zmianę rozbiórów:

- *Fast* – co 15 impulsów;
- *Medium* – co 30 impulsów (ustawienie standardowe);
- *Slow* – co 50 impulsów.

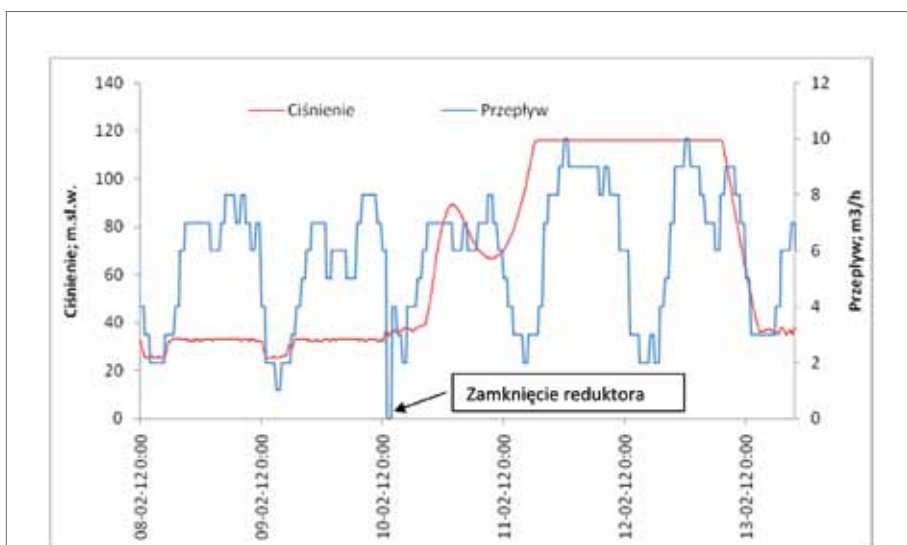
Zgodnie z powyższym: przy stałym przepływie – 20 m³/h, impulsowaniu co 1 m³ i szybkości zmiany nastawy ciśnienia co 30 impulsów (medium) regulacja ciśnienia następować będzie co 45 min. Przy tej samej wartości przepływu i impulsowaniu co 0,1 m³ regulacja odbywać się będzie co 10 min. Z tego powodu parametry regulacji ciśnienia na podstawie wartości przepływu powinny być dobrane indywidualnie dla każdej zasilanej strefy. O ile regulacja co 10 min może nie dać oczekiwanych efektów, tak stosunkowo częsta regulacja może doprowadzić do niestabilności pracy reduktora i pojawienia się uderzeń hydraulicznych (przy szybkozmiennych rozbiórach).



Rys. 8. Praca reduktora sterowanego za pomocą sterownika zewnętrznego w trybie czasu



Rys. 9. Praca reduktora sterowanego za pomocą sterownika zewnętrznego w trybie przepływu



Rys. 10. Zamarznięcie rurki z wodą pod ciśnieniem zredukowanym

Wadą tego trybu regulacji jest przypadek wystąpienia awarii sieci – z powodu zwiększonego rozbioru wody sterowniki pracujące w trybie przepływu będą podnosić wartość ciśnienia do momentu uzyskania punktu maksymalnej nastawy. W zależności od zastosowanego sterownika punktem tym jest maksymalna wartość ciśnienia związana albo z mechanicznym zabezpieczeniem sterownika, albo z maksymalnym punktem krzywej zależności ciśnienia od przepływu, po którego przekroczeniu wartość ciśnienia jest stała. Wynikiem będzie zwiększenie wydajności wycieku zamiast jego ograniczania.

Drugą niedogodnością tego trybu regulacji jest przypadek minimalnej wartości przepływu lub wręcz jego braku, wynikającego np. z zastosowania zbyt dużej wagi impulsu: sterownik może utrzymywać maksymalną nastawę ciśnienia.

Na rys. 9 przedstawiono pracę sterownika regulującego ciśnienie w zależności od odczytanej wartości przepływu.

Podsumowując: sterowanie wartością ciśnienia w trybie czasu jest zazwyczaj rozwiązaniem optymalnym dla większości przypadków spotykanych w sieciach wodociągowych. Ponadto pozwala na osiągnięcie efektu obniżenia i kontroli wartości minimalnego nocnego przepływu. Natomiast regulacja ciśnienia w zależności od zarejestrowanej wartości przepływu najlepiej sprawdza się przy rozległych sieciach wodociągowych z wysoką wartością strat hydraulicznych.

Problemy techniczne stosowania sterowników zewnętrznych

a. Zabezpieczenie w wypadku mechanicznego uszkodzenia rurek/przetworników sterujących:

- sterownik pneumatyczny i mechaniczny – uszkodzenie (np. zamrożenie) rurki doprowadzającej wodę pod ciśnieniem zredukowanym do sterownika zostanie odczytane jako wzrost ciśnienia za reduktorem. W momencie przekroczenia ciśnienia nastawy sterownik zareaguje na

tychmiastowym zamknięciem zaworu głównego (rys. 10);

- sterownik hydrauliczny – poprzez odpowiedni stopień wkręcenia aktuatora ustawiane są wartości minimalnego i maksymalnego ciśnienia nastawy sterownika, które stanowią mechaniczne zabezpieczenie przed wzrostem/spadkiem ciśnienia. W wypadku uszkodzenia którejkolwiek z rurek (np. zamrożenia, pęknięcia czy odłączenia od aktuatora) bądź uszkodzenia urządzenia sterownika, odczytując wartość ciśnienia, będzie zamykał lub otwierał reduktor do momentu osiągnięcia ustawionego mechanicznie minimum lub maksimum.
- b. Problemy uruchomienia i regulacji początkowej sterownika
- Praca każdego zaworu redukcyjnego, zamontowanego na sieci wodociągowej, powinna być dostosowana do specyficznych parametrów zasilanego rejonu. Zawory różnią się konstrukcjami, zakresem regulacji, rozwiązaniami sterowania szybkością otwierania/zamykania zaworu. Dlatego każdy

sterownik powinien być regulowany indywidualnie, ponieważ może okazać się, że po jego zamontowaniu z nastawami fabrycznymi producenta reduktor pracuje niestabilnie. Przykłady problemów z badań terenowych dla różnych rodzajów urządzeń pokazano poniżej.

- Regulacja pracy sterownika po uruchomieniu

Na rys. 11 przedstawiono współpracę reduktora ciśnienia ze sterownikiem pneumatycznym, regulującym ciśnienie w trybie czasu, w pierwszą noc po uruchomieniu. Obniżenie wartości ciśnienia w ramach zmiany nastaw z dziennej na nocną (niższą o 1,0 bar), wywołało niekorzystne zjawisko pulsacji ciśnienia przez cały czas trwania nocnej nastawy. Chwilowe wahania ciśnienia wynosiły ok. 1,0 bara. Dodatkowo pomiar wykazał konieczność rejestracji ciśnienia nie tylko w miejscu instalacji sterownika, ale również na obszarze zasilanej strefy z wysoką częstotliwością zapisu (co najmniej minutową).

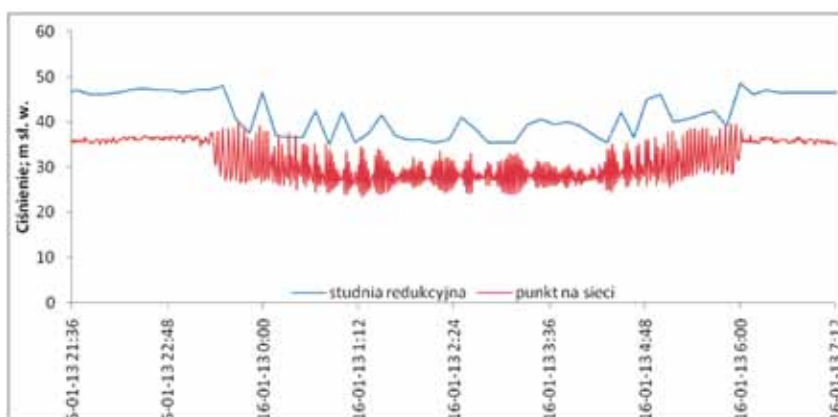
W celu eliminacji uderzeń hydraulicznych w godzinach nocnych przeprowadzono kilka zmian ustawień sterownika, takich jak:

- zakres kontroli – (wartość, która musi zostać przekroczona, aby nastąpiła akcja sterowania ciśnieniem) został zwiększony;
- okres czasu uśredniania ciśnienia – (wyznaczanie średniego ciśnienia w określonym przedziale czasu, które porównywane jest z ciśnieniem zadany) został zwiększony;
- wartość ciśnienia czynnika sterującego – została zmniejszona.

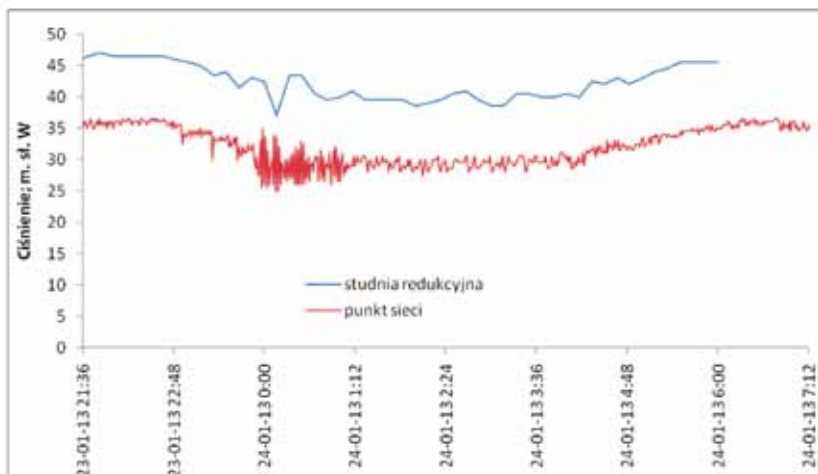
Po przeprowadzeniu zmian ustawień sterownika uzyskano następujący obraz współpracy sterownika z reduktorem (rys. 12), a dodatkowo planowe jest przeprowadzenie kolejnych regulacji parametrów pracy sterownika w celu wyeliminowania wahań ciśnienia w godz. 23:00 – 00:00.

- Regulacja szybkości otwierania/zamykania reduktora:

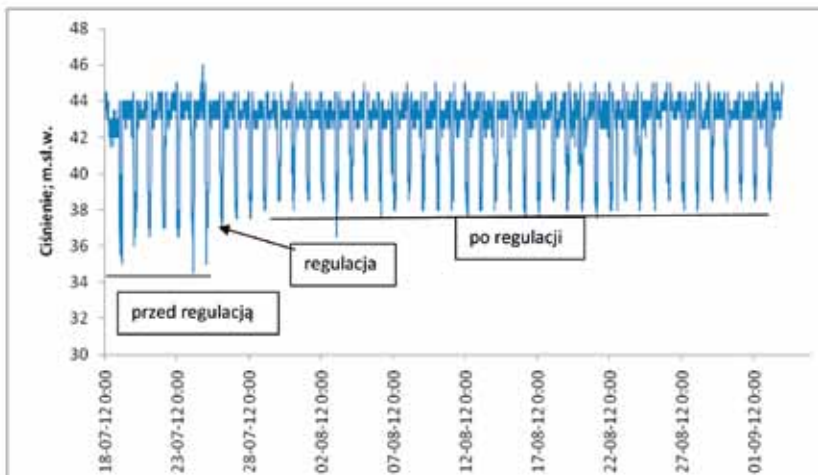
Na rys. 13 przedstawiono współpracę reduktora ciśnienia ze sterownikiem przed i po regulacji zaworu szybkości reakcji. Przed rozpoczęciem regulacji zawór szybkości otwarcia reduktora otwarty był na



Rys. 11. Niepoprawna współpraca sterownika z reduktorem: linia czerwona – częstotliwość rejestracji i zapisu co 1 min; linia niebieska – częstotliwość rejestracji i zapisu co 15 min



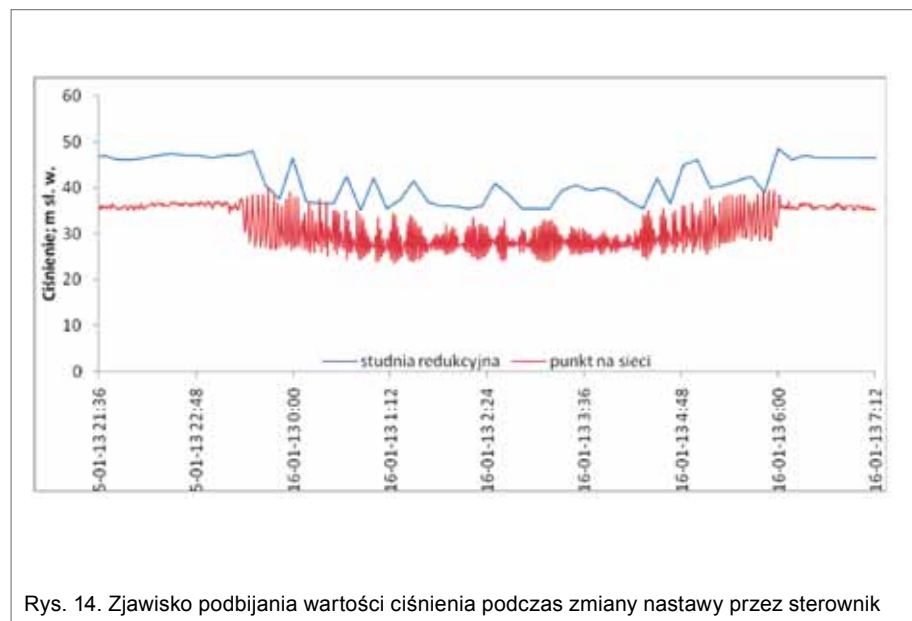
Rys. 12. Regulacja współpracy sterownika z reduktorem: linia czerwona – częstotliwość rejestracji i zapisu co 1 min; linia niebieska – częstotliwość rejestracji i zapisu co 15 min



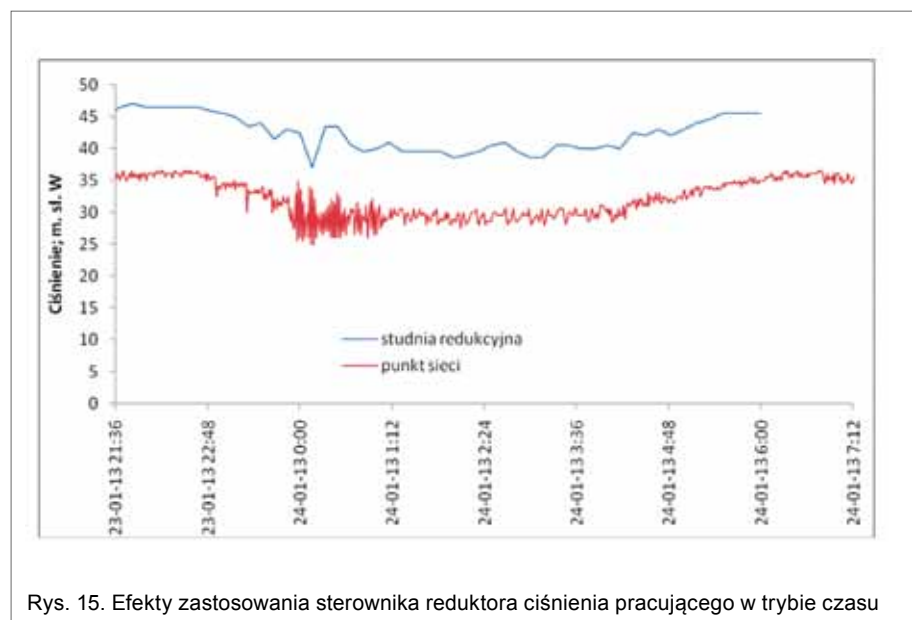
Rys. 13. Wpływ regulacji szybkości reakcji otwarcia reduktora na regulację ciśnienia przez sterownik

Tabela 1. Zestawienie zbiorcze sterowników reduktorów ciśnienia

| | Sterownik pneumatyczny | Sterownik hydrauliczny | Sterownik mechaniczny |
|---------------------------|---|--|---|
| Wersje sterownika | sterowanie lokalne; sterowanie zdalne – utrzymanie stałej wartości ciśnienia w krytycznym punkcie sieci na podstawie sprzężenia zwrotnego z rejestratorem zamontowanym w tym punkcie | sterowanie lokalne | sterowanie lokalne |
| Tryby sterowania | wielopunktowy profil czasowy profil przepływu | dwupunktowy profil czasowy (min/max) wielopunktowy profil czasowy profil przepływu | wielopunktowy profil czasowy |
| Parametry trybu czasu | 24 strefy czasowe 24 strefy czasowe dla każdego z dwóch scenariuszy (np. scenariusz weekendowy i dni powszednich) | dwupunktowa zmiana czasu (noc/dzień) 6 stref czasowych z możliwością zmiany czasu zimowego na letni | 5 stref czasowych dla każdego z 2 scenariuszy (np. scenariusz weekendowy i dni powszednich) |
| Zasilanie | bateryjne | bateryjne | sieciowe |
| Przesył danych/połączenie | RS232 GSM/GPRS; jeden ze sterowników posiada możliwość wysyłania komunikatów alarmowych oraz do zmian nastaw ciśnienia (komunikacja dwukierunkowa) | IrDA do RS232 wielokomunikacyjne łącze dla paknet, GSM, radio; możliwość zdalnej zmiany nastaw | RS232 GSM, modem, dwukierunkowa komunikacja SMS-owa. Możliwość wysyłania komunikatów alarmowych przez sterownik oraz zmian nastaw ciśnienia przez użytkownika. |
| Czynnik sterujący | powietrze | woda | silnik krokowy |
| Rejestrator | dwukanałowy (ciśnienie/przepływ) | czterokanałowy (ciśnienia wejściowe/wyjściowe, przepływ, dowolny sygnał dodatkowy) | brak |
| Stopień ochrony | IP68 | IP68 | IP65 (sterownik), IP68 (silnik) |
| Programowanie | poziomu PDA lub PC | z poziomu wyświetlacza sterownika lub PC/PDA | z poziomu wyświetlacza sterownika |
| Uwagi | Funkcja ciśnienia pożarowego Konieczność dodatkowego zabezpieczenia sterownika przy możliwości zalania ze względu na konieczność dostępu do powietrza | Zalecane jest okresowe sprawdzenie czystości filtra w instalacji sterownika | Funkcja ciśnienia pożarowego zadawana albo z poziomu trybu manualnego, albo za pomocą SMS-ów W przypadku zaniku napięcia wartość ciśnienia jest równa ostatniej nastawie sterownika przed zanikiem napięcia. |



Rys. 14. Zjawisko podbijania wartości ciśnienia podczas zmiany nastawy przez sterownik



Rys. 15. Efekty zastosowania sterownika reduktora ciśnienia pracującego w trybie czasu

3 obroty, co oznacza powolną reakcję w przypadku zwiększających się rozbiorów wody (stąd spadki ciśnienia w godzinach nocnych). W wyniku regulacji zmieniono stopień otwarcia zaworu (na 6 obrotów), zwiększając szybkość reakcji zaworu i jego stabilniejszą pracę, szczególnie w godzinach zmniejszonych rozbiorów.

Regulując stopień otwarcia zaworu szybkości reakcji, udało się również wyeliminować zjawisko chwilowego „podbijania” ciśnienia podczas zmiany nastawy (rys. 14).

W tabeli 1 przedstawiono zbiorcze zestawienie parametrów sterowników zaworów redukcji ciśnienia.

Efekty zastosowania sterowników zaworów redukcji ciśnienia

Zastosowanie sterowników zewnętrznych (przy ich poprawnej konfiguracji) generuje szereg pozytywnych efektów:

- obniżenie nadwyżki ciśnienia w sieci w godzinach minimalnych rozbiorów;
- stabilizację ciśnienia w sieci;
- obniżenie ilości wody traconej przez nieszczelności;
- obniżenie częstotliwości występowania nowych awarii.

Przykładowo dla jednego z przedsiębiorstw wodociągowych Górnego Śląska zastosowanie obniżania ciśnienia o 0,8 bara w godzinach nocnych

(przez 5 h) przez sterownik regulujący ciśnienie w trybie czasu spowodowało obniżenie wartości minimalnego nocnego przepływu o 10 m³/h (rys. 15). Dodatkowo następnego dnia po wyłączeniu sterownika w zasilanym rejonie sieci pojawiła się duża awaria wodociągowa, wskazując zasadność obniżania ciśnienia w godzinach minimalnych rozbiorów.

Podsumowanie

Zastosowanie zaawansowanej regulacji ciśnienia sieci wodociągowej z wykorzystaniem sterowników zaworów redukcyjnych niesie ze sobą wiele niepodważalnych, udokumentowanych korzyści. W celu uzyskania właściwej współpracy zaworu redukcyjnego ze sterownikiem należy odpowiednio wyregulować urządzenia, dostosowując ich pracę do specyficznych parametrów zasilanego rejonu.

Literatura:

- [1] LAMBERT A.O.: *International report on water losses management and techniques*. Water Science & Technology; Water Supply, 2002.
- [2] KORAL W.: *Problem obniżania ciśnienia na styku sieci magistralnych GPW i sieci miejskich na przykładzie dwóch miast śląskich*, III konferencja Aktualne zagadnienia w uzdatnianiu i dystrybucji wody, Szczyrk 2005.
- [3] KORAL W., KILIAN E.: *Problemy z eksploatacją zaworów redukcji ciśnienia sterowanych własnym medium przy jednoczesnej regulacji dławieniowej sieci wodociągowej*, Konferencja „Nowe Technologie w Sieciach i Instalacjach Wodociągowych i Kanalizacyjnych”, Ustroń 2010.
- [4] KILIAN E.: *Eksploatacja reduktorów ciśnienia, na podstawie doświadczeń BPK Sp. z o.o.* Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, zeszyt 59 (nr 2/2012/I) Rzeszów, s. 41–54.

mgr inż. Ewelina Kilian – Bytomskie Przedsiębiorstwo Komunalne Sp. z o. o., Politechnika Śląska w Gliwicach;

dr inż. Wojciech Koral – Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji w Gliwicach, Politechnika Śląska w Gliwicach